



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Istanbul Commerce University Journal of Science

<http://dergipark.org.tr/ticaretfbid>



Araştırma Makalesi / Research Article

NB-IOT VE LORA HABERLEŞME TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ*

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF NB-IOT AND LORA
COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Sümeyye YASİNTİMUR¹

Vedat TAVAS²

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
syasintimur@outlook.com

Geliş Tarihi / Received
08.04.2021

Kabul Tarihi / Accepted
08.06.2021

Öz

LPWAN teknolojilerinin düşük güç gereksinimleri, uzun menzile iletim yetenekleri, ölçeklenebilirlikleri, geniş alan kapsayıcılıkları gibi parametreler değerlendirildiğinde IoT uygulamalarındaki kullanımları günbegün artmaktadır. Bu çalışmada İstanbul'un Eyüpsultan ilçesinde bir sitede LoRa ve NB-IoT teknolojilerinin performansı değerlendirilmektedir. LoRa testleri koridorlarda bulunan gaz sayaçlarının üzerinde gerçekleştirilirken; NB-IoT testlerinde ise metal kapak ardındaki sayaç şaftları içerisinde gözlemler yapılmıştır. Katlarda LoRa testlerinde RSSI ve SF; NB-IoT'de ise RSSI değerleri kaydedilmiştir. Analizler LoRa için 14; NB-IoT için 16 paket üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar gönderilen 30 paketin baz istasyonlarına kayıpsız bir şekilde ulaştığını gösterirken sinyal kalitesinin belirli noktalarda ideal aralıkta bulunmadığı gözlemlenmiştir. Bu şartlarda kurulum yapıldığı takdirde paket kayıplarının yaşanacağı öngörülmektedir. Ancak daha iyi bir gözlem için daha fazla paket üzerinde testler yapılmasının gerekliliği de belirtilmelidir.

Anahtar Kelimeler: LoRa, LoRaWAN, LPWAN, NB-IoT.

Abstract

Considering the parameters such as low power requirements, long-range transmission capabilities, scalability, and inclusiveness of LPWAN technologies, their use in IoT applications is increasing. In this study, the performance of LoRa and NB-IoT on a site in Eyüpsultan district of Istanbul is evaluated. While LoRa tests are carried out on the gas meters in the corridors; In the NB-IoT tests, observations were made inside the meter shafts behind the metal cover. RSSI and SF in LoRa; In NB-IoT, RSSI values are recorded. 14 for analyzes LoRa; Made on 16 packages for NB-IoT. While the results showed that the 30 packets sent reached the base stations, it was observed that the signal quality was not ideal at certain points. It is predicted that the packages will be lost when installed under these conditions. However, it should be noted that tests on more packages are necessary for a better observation.

Keywords: LoRa, LoRaWAN, LPWAN, NB-IoT.

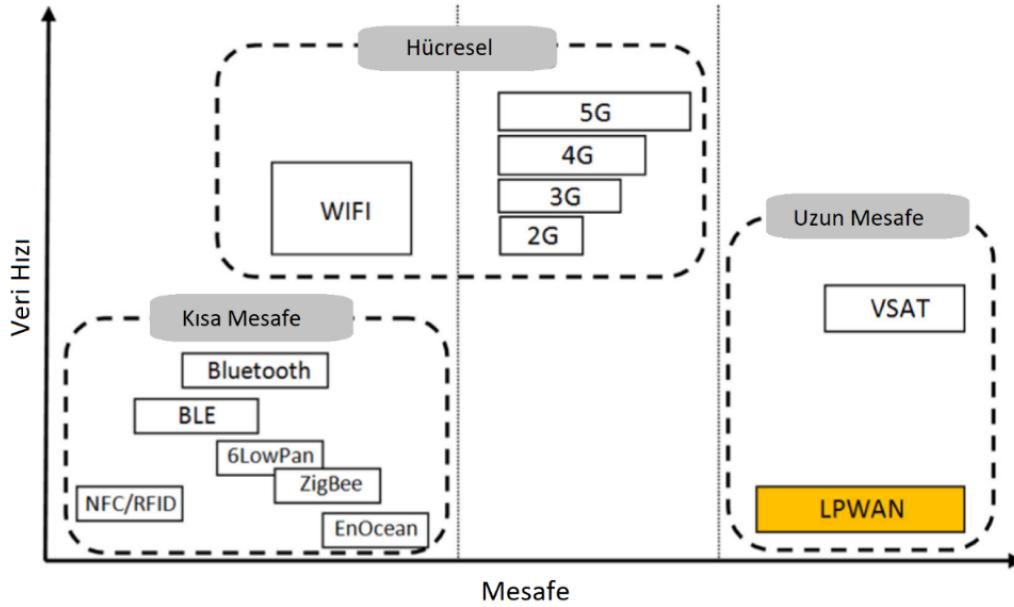
*Bu yayın Sümeyye YASİNTİMUR isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Programındaki Lisansüstü tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Küçükalyalı, İstanbul, Türkiye. syasintimur@outlook.com, Orcid.org/0000-0003-2352-0343.

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Küçükalyalı, İstanbul, Türkiye. vtavas@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0003-2945-9846.

1. GİRİŞ

Literatürde LPWAN (Low Power Wide Area Network, Düşük Güç Geniş Alan Ağı) olarak yer alan kavramın çatısı altında bulunan farklı haberleşme teknolojilerinin kullanımına birçok Dünya şehirlerinde rastlamak mümkündür. Bu teknolojilerin popülaritesinin gün geçtikçe artıyor oluşunun arkasında yatan birçok sebep bulunmaktadır. Bunların başında hiç kuşkusuz gereksinim duydukları güç miktarının düşük olması, enerji verimliliğinin yüksek olması, ölçeklenebilirlik, iletim yapılan mesafenin uzunluğu ve geniş alan kapsayıcılığı gelmektedir (Kabalcı & Ali, 2019). Özellikle IoT (Internet of Things, Nesnelerin İnterneti) teriminin hayatımıza girmesi akabinde sürekli olarak internete bağlı cihaz sayısının artmasıyla birlikte (Lueth, 2018) bu kaynakların pil ömürlerinin uzun ve dolayısıyla enerji verimliliklerinin yüksek olması talebi doğmuştur. Bu noktada LPWAN başlığı altında bulunan birçok haberleşme teknolojisinin uzun pil ömrü vaadi, ilgili teknolojiler özelinde literatür taramaları, simülasyonlar ve gerçek ortam testlerine yönelimi beraberinde getirmiştir. Bunun yanı sıra bu teknolojilerin en büyük vaatlerinden biri de uzun mesafelere iletim yapabilme kabiliyetleridir. Bu noktada Şekil 1 aracılığı ile de görülebileceği üzere LPWAN teknolojileri, kısa menzil (BLE, 6LowPan, Bluetooth, EnOcean, ZigBee, NFC/RFID) ve hücresel (2G, 3G, 4G ve 5G, Wi-Fi) radyo iletişim yöntemlerinden çok daha iyi bir iletim mesafesi sunmaktadır (Mekki ve ark., 2019).



Şekil 1. Radyo İletişim Teknolojilerinin Mesafe ve Veri Hızı Kapasiteleri (Mekki ve ark., 2019)

Ancak uzun mesafeye iletim ve enerji verimliliği gibi parametrelerin var olabilmesi için ilgili teknolojilerin hücresel ve birçok kısa mesafe haberleşme yöntemlerinin bazı yeteneklerinden feragat etmeleri gerekmektedir. Bunların başında çok yüksek veri hızları ve düşük gecikme oranları gelmektedir. Bu iki faktörün elzem olduğu noktalarda LPWAN teknolojilerinin kullanımı beklenen faydayı sağlamayacaktır. Örnek olması adına video izleme sistemleri, akıllı ulaşım ve lojistik faaliyetleri gösterilebilir (Adelantado ve ark., 2017). Bu doğrultuda ilgili iletişim yöntemlerinin gecikmeye duyarlılığı olmayan ve günün her saatinde veri iletim mecburiyeti bulunmayan uygulamalar için tercih edilmesinin daha iyi sonuçlar doğurması beklenmektedir. Bu çalışmadaki gaye sayaçların uzaktan izlenmesini sağlamak olduğundan ve sayaçların gecikme hassasiyeti, sürekli veri iletim gereksinimlerinin bulunmamasının yanı sıra pil ömürlerinin uzun olması ihtiyaçları düşünüldüğünde ilgili çalışma özelinde LPWAN çatısı altında yer alan LoRa (Long Range, Uzun Menzil) ve NB-IoT (Narrowband IoT, Dar Bant Nesnelerin İnterneti) iletişim protokolleri değerlendirilmiştir.

Literatürde LPWAN teknolojilerinin teorik olarak kıyası, seçilen pilot bölgelerde simülasyon programları aracılığı ile performans analizi ve gerçek ortam testlerini içeren birçok farklı çalışma yayınlanmıştır. Bu kapsamda Mekki ve ark. (2019) LPWAN başlığı altında yer alan LoRa, NB-IoT ve Sigfox iletişim yöntemlerinin teorik olarak kıyasını yapmaktadırlar. İlgili çalışmada her üç teknolojinin de literatürde yer alan teknik özelliklerine değinilmiş sonrasında ilgili teknolojiler bazı IoT faktörleri çerçevesinde kıyaslanmış ve son olarak ise belirli IoT uygulamalarında hangi teknolojinin tercih edilmesi gerektiğine değinilmiştir.

Paredes ve ark. (2019) LoRa'nın performansını ölçmek adına İtalya'da üç farklı senaryoyu içerecek şekilde testler yapmışlardır. İlk iki senaryoda alıcı ve vericilerin oluşturduğu noktadan noktaya iletişim yöntemi, sonuncu senaryoda ise bir alıcı ve birden fazla vericiden oluşan yıldız ağ topoloji modeli kullanılmıştır. Bu testler boyunca SNR (Signal to Noise Ratio, Sinyal Gürültü Oranı), RSSI (Received Signal Strength Indication, Alınan Sinyal Gücü Göstergesi), spektrum analizi ile alınan güç, kayıp paket oranı, gibi parametreler gözlemlenmiştir. Tüm bu sonuçlar doğrultusunda LoRa'nın kentte kullanılabilirliğine dair bir çıktı oluşmuştur.

Vatcharationsakul ve ark. (2017), LoRaWAN'ın hem iç hem de dış mekân performans analizini yapabilmek adına Tayland'ın Bangkok kentinde bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Testlerde kullanılan bir tane uç cihaz kentin farklı konumlarına yerleştirilerek SNR ve kayıp paket oranı gibi parametreler gözlemlenmiştir. Özellikle iç mekânda gerçekleştirilen testlerde paket kayıp oranlarının çok yüksek olmasına bakılacak olursa eğer sonuçların ideal aralıkta bulunmadığı söylenebilmektedir.

Li ve ark. (2017), LoRa teknolojisini yelken izleme sistemine entegre edebilmek adına bir dizi deney yapmışlardır. İlgili çalışmada Çin'in Şangay kentinde bir gölde ve Rio yelken sahasında birçok noktada gözlemler yapılmış ve sonrasında gerekli değerlendirmeler yapılmıştır. Bu testler sonucunda LoRa haberleşme teknolojisinin Yelken İzleme Sistemi için uygulanabilirliğine karar verilmiştir. Ancak tepelerin, binaların, ağaçların ve dalgaların LoRa'nın performansını etkilediği de önemli bir çıktı olarak belirtilmiştir.

Poddar ve ark. (2020), NB-IoT ve SigFox'un kapsamına dair Estonya'nın iki üniversitesinde yer alan iki farklı kampüste bazı testler gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerde NB-IoT için RSSI, RSRP (Reference Signal Received Power, Alınan Referans Sinyali Gücü), RSRQ (Reference Signal Received Quality, Alınan Referans Sinyali Kalitesi) değerleri hesaplanırken SigFox için yalnızca RSSI değeri gözlemlenmiştir. Çalışmanın çıktılarına bakılınca dış mekân ve iç mekân ölçümlerinde hem Sigfox'un hem de NB-IoT'nin umut verici sonuçlar sergilediği gözlemlenmiştir. Buna ilaveten NB-IoT, derin iç mekân söz konusu olduğunda iki kampüste farklı paket kayıp oranlarına sahip olmuştur. Ayrıca derin iç mekânda NB-IoT'nin paket kayıp oranının Sigfox'a göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

2. TEORİ

Bu kısımda LoRa ve NB-IoT haberleşme teknolojilerinin teorik açıklamalarına yer verilmiştir. Bölüm 2.1'de LoRa ve LoRaWAN teknolojilerine; Bölüm 2.2'de ise NB-IoT teknolojisine değinilmiştir.

2.1.LoRa ve LoRaWAN

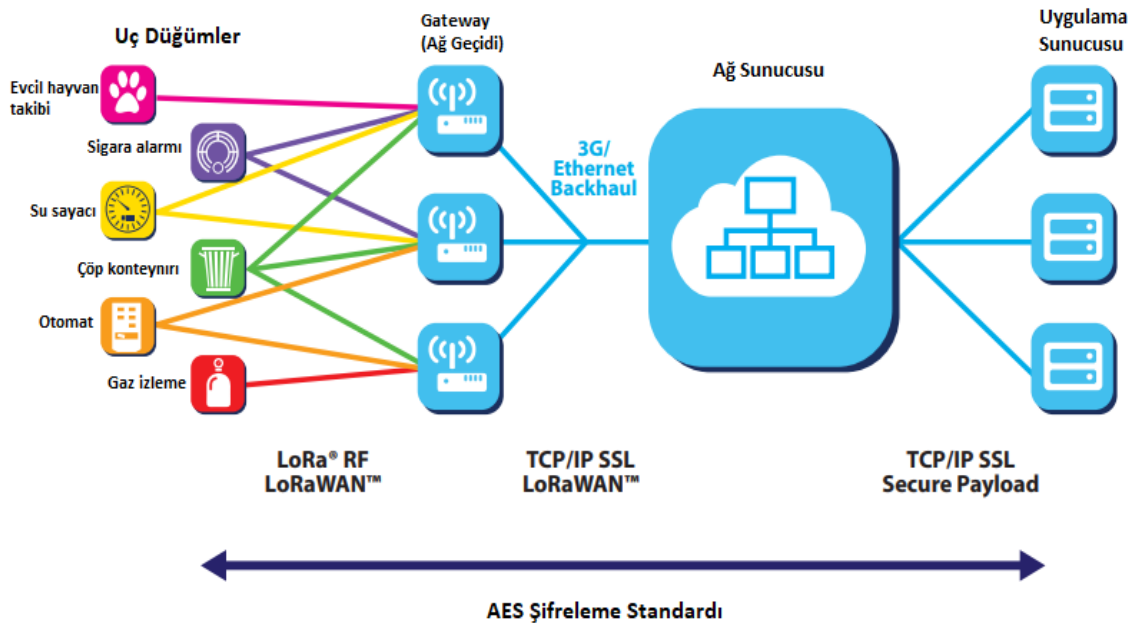
LoRa 2009 yılında Cyclo adlı bir Fransa girişimi aracılığıyla ilan edilmiş ve 2012 yılında Semtech tarafından satın alınarak patentlenmiştir. Buna ilaveten 2015 yılında LoRa-Alliance tarafından standartlaştırılması tamamlanmıştır (Lalle ve ark., 2019). Bu tarihten itibaren birçok ülkede

kullanılmaya başlanan LoRa şu anda 162 ülkede aktif olarak kullanılmaktadır. LoRa lisanssız ISM (Industrial Scientific Medical, Sınai, Bilimsel ve Tıbbi Cihaz) frekans bandında yayın yapmaktadır ve bu da kıtalar arası farklı frekans değerlerini işaret etmektedir. Bu değerler Avrupa’da 868 MHz, Kuzey Amerika’da 915 MHz ve Asya’da 433 MHz’dir (LoRa Alliance, 2021).

LoRa uzun mesafe iletimi sağlayabilmek adına kullanılan kablosuz modülasyon yöntemi veya bir diğer ifadeyle fiziksel katmandır. Geleneksel kablosuz haberleşme teknolojilerinin fiziksel katmanda kullandıkları bir modülasyon olan FSK (Frequency-shift keying, Frekans Kaydırmalı Anahtarlama) modülasyonunun aksine LoRa, CSS (Chirp Spread Spectrum) modülasyonu kullanılmaktadır. Bu sayede düşük güç tüketimi yeteneğine ilaveten uzun iletim mesafesi olanağına da sahip olmaktadır (LoRa Alliance, 2015).

LoRaWAN ise LoRa’nın ağ mimarisi ve iletişim protokolüdür. Uç cihazın hizmet kalitesi, pil ömrü ve güvenliğini belirleyen en önemli faktörler bu ağ mimarisi içerisinde yer almaktadır. LoRaWAN yıldız ağ topolojisini kullanır (LoRa Alliance, 2015).

Şekil 2 incelendiğinde ilgili topolojide sürecin üç aşamalı bir dizilimi olduğu görülebilir. Bu ilerleyişte uç düğümler (sayaçlar, sensörler gibi tüm akıllı cihazlar) aracılığı ile toplanan veriler ağ geçidine iletilir. Bu uç düğümler herhangi bir ağ geçidi ile ilişkilendirilmemektedir. Uç düğüm tarafından iletilen veriler onu duyabilme ihtimaline sahip tüm ağ geçitleri tarafından dinlenir. Bu sayede paket kayıplarının önüne geçmek hedeflenmektedir (LoRa Alliance, 2015). Topolojinin ikinci adımında ağ geçidine iletilen veriler bir ana taşıyıcı aracılığıyla (hücresel, Wi-Fi, uydu ya da Ethernet) bulut tabanlı ağ sunucusuna iletilir. Güvenlik kontrolleri ve iletilen çoklu paketlerin filtrelenmesi bu aşamada sağlanır. Son olarak ağ sunucusunda hazır halde bulunan veriler dilendiği takdirde uygulama sunucularına iletilir.



Şekil 2. LoRaWAN Mimarisi (LoRa Alliance, 2015)

Yukarıda da değinildiği üzere Lora CSS modülasyonunu kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra LoRa sabit bir bant genişliği boyunca kendi hızını ayarlayabilmektedir. Bunu yapıyor olmasının en büyük gerekçesi ağ performansının düzeyini korumaktır. Yani LoRa farklı veri hızları ile iletim yapabilmektedir. LoRa’nın farklı veri hızlarını ifade eden kavram literatürde SF (Spreading Factor, Yayılma Faktörü) olarak yer almaktadır. SF, Avrupa’da 7 ile 12 arasında değer almakta bu da LoRa’nın 6 farklı veri hızına sahip olduğunu göstermektedir. LoRa farklı SF değerlerinde

saniyede 300 bit ile 50 kilobit veri hızında yayın yapabilmektedir (Mekki ve ark., 2019). LoRa'nın veri hızındaki değişimin daha iyi kavranabilmesi adına Shannon-Hartley teoremine değinilmesi gerekmektedir.

Shannon-Hartley teoremi gürültülü bir ortamda belirli bant genişliğine sahip kanal üzerinde gönderilebilecek en çok veri miktarını ifade eder. (Semtech, 2015). Denklem 1 aracılığı ile bu teoremi ifade eden formüle erişilebilir.

$$C = B \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1)$$

Bu formülde C kanal kapasitesini (bit/saniye) ifade ederken B kanal bant genişliğini (Hertz, Hz), S ortalama alınan sinyal gücünü (watt) ve N ortalama gürültü veya girişim gücünü ifade eder. S/N ise sinyal gürültü oranını temsil etmektedir (Semtech, 2015).

Formül yeniden düzenlendiğinde Denklem 2'de gösterildiği şekle gelmektedir.

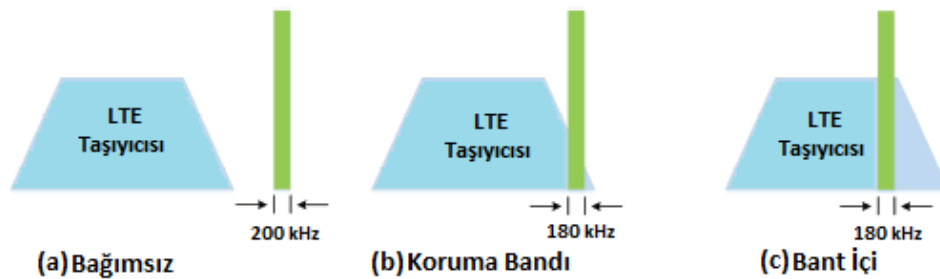
$$\frac{C}{B} = 1,433 \times \frac{S}{N} \quad (2)$$

Denklem 2 incelendiğinde kanal kapasitesinin (C) artışının C/B oranını artırdığı ve bu durumun da sinyal gürültü oranını (S/N) artırdığı görülmektedir (Semtech, 2015). LoRa bu artışın telafi edilebilmesi noktasında farklı yayılma faktörleri ile bir kanal optimizasyonu sunmaktadır.

2.2. NB-IoT

NB-IoT 2016 yılında 3GPP'nin 13. sürümde bahsedilmiş ve standartlaştırılmıştır (Lalle ve ark., 2019). Bu tarihten itibaren Dünya genelinde kullanımı devam etmektedir. NB-IoT'nin LoRa'dan temelde en büyük farklılığı LoRa'nın lisanssız ISM bandını kullanıyor olmasına karşın NB-IoT lisanslı bir frekans olan LTE (Long Term Evolution, Uzun Süreli Evrim) bandını kullanmaktadır. Bu da sıfırdan bir kurulum süreci ve kurulum maliyeti yerine şehirlerin birçok noktasında halihazırda bulunan mevcut baz istasyonlarının kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

NB-IoT lisanslı LTE frekans bandını kullanırken üç farklı çalışma modunda çalışabilmektedir. Şekil 3'ten de görüleceği üzere bunlardan ilki bağımsız çalışma modudur. Bu çalışma biçiminde NB-IoT frekanslarının yerleşimi, 200 kHz bant genişliğine sahip bir veya daha fazla Fiziksel Kaynak Bloğu (PRB) alan mevcut frekans spektrumuna tahsis edilir. İkinci çalışma modunun ise koruma bandı modu olduğunu söylenebilir. Bu senaryoda, NB-IoT frekansı, 180 kHz bant genişliğine sahip bir veya daha fazla Fiziksel Kaynak Bloğu (PRB) alan mevcut LTE frekansının koruma bandını kullanır. Son mod ise literatürde bant içi çalışma modu olarak yer almaktadır. NB-IoT frekansı, 180 kHz bant genişliğine sahip bir veya daha fazla Fiziksel Kaynak Bloğu (PRB) alan mevcut LTE frekans bloğu içinde kullanılır. (Chen ve ark., 2017)



Şekil 3. NB-IoT Çalışma Modları (Chen ve ark., 2017)

NB-IoT bir 3GPP standardı olmasına karşın uzun pil ömrü vaadini gerçekleştirmek adına çok daha gelişmiş güç tasarrufu şemalarına sahiptir. Bu doğrultuda NB-IoT uzun pil ömrünü ve enerji verimliliğini sağlamak adına eDRX (Extended Discontinuous Reception, Artırılmış Kesintili Alım) ve PSM (Power Saving Mode, Güç Tasarruf Modu) yöntemlerini kullanmaktadır (Chen ve ark., 2017). PSM modunda ağ üzerinde yer alan cihazlar faaliyetlerini neredeyse durdurup derin bir uyku durumuna geçmekte ve bu durumda cihaza ağ üzerinden ulaşım sağlanamamaktadır. Ancak bu tasarımda veri iletim zamanlarında cihazın kendiliğinden uyanması mümkündür. 3GPP tarafından geliştirilen ve 3GPP Rel.13'te tanımlanan eDRX modunda ise ağ üzerinde yer alan cihazlar belirli süreliğine bekle durumuna geçmektedirler. Bu moddayken cihaz tam anlamıyla bir ağ bağlantısı kurmadan veri iletim göstergelerini dinleyebilmekte ve bu dinleme periyodu cihazın tam performans bir halde veriyi dinleme periyodundan hiç kuşkusuz daha kısa olacağı için pil ömrünün azami düzeye çıkarılması sağlanabilmektedir (Sultania ve ark., 2019).

NB-IoT yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı olmak üzere iki yönlü veri iletimi yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. NB-IoT aşağı bağlantı iletim şemasında da yukarı bağlantı iletim şemasında da en az 180 kHz bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır (Wang ve ark., 2017).

NB-IoT aşağı bağlantı iletim şemasında yer alan her bir çerçeve 10 alt çerçeveyi içermekte ve bu çerçevelerin 1 ms uzunluğunda olduğu bilinmektedir. İlgili 10 alt çerçevenin her biri 7 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama) uzunluğunda iki yuvadan oluşmaktadır. En küçük iletim birimi olan bir kaynak elemanı bir alt taşıyıcı x bir sembol olarak formüle edilmektedir. Kaynak elemanı, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying, Dört Fazlı Kaydırmalı Anahtarlama) için 2 bit, 16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation, 16-Karesel Genlik Modülasyonu) için 4 bit ve 64-QAM için 6 bit olarak değer alabilmektedir (Malik ve ark., 2018).

NB-IoT, yukarı bağlantı iletim şemasında ise tek ve çok perdeli iletimleri destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Çok perdeli iletimde SC-FDMA (Single Carrier Frequency-Division Multiple Access, Tek Taşıyıcı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim) şemasını kullanmaktadır. Bu şema 15 kHz alt taşıyıcı aralığı ve 0,5 ms yuvalı 180 kHz toplam bant genişliğine sahiptir. Tek perdeli iletimde ise 15 kHz ve 3.75 kHz alt taşıyıcı aralığını desteklemektedir (Malik ve ark., 2018).

3. METODOLOJİ VE UYGULAMA

Bu çalışmada hem doğalgaz hem de su sayaçları için çıktı oluşturulabilmesi adına her iki sayaç tipinin de yer aldığı ortak bir pilot bölge belirlenmiştir. Bu bölge Eyüpsultan ilçesi sınırları içerisinde yer alan ve her bloğu 12 katlı olan dört bloklu bir sitedir. Her bir bloğun yatay uzunluğu 55 metre, yatay genişliği 22 metre, site genişliği 160 metredir. Bu sitenin üç bloğu test için kullanılmış olup bir blok LoRa testleri, ikinci blok NB-IoT testleri ve üçüncü blok ise LoRaWAN ağ geçidinin konumlandırılması için tercih edilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde görüleceği üzere sitede yer alan bloklar soldan sağa doğru A1, A2, A3 ve A4 olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 4. Site Planı

Şekil 4'te de görülebileceği üzere LoRaWAN ağ geçidi A2. Bloğun bina girişi referans alınarak sol cephesinin çatı katına gerekli kablolar yapılarak, herhangi bir montaj aparatı kullanılmadan konumlandırılmış ve A1. Bloğun katlarında LoRa sinyal seviyesinin kalitesine dair ölçümler kayıt altına alınmıştır. A4. Blokte ise NB-IoT testleri yapılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. LoRa tarafından gönderilen paket içerisinde RSSI ve SF değerleri not alınırken; NB-IoT testlerinde ise RSSI değeri değerlendirilmiştir.

RSSI (Received Signal Strength Indication, Alınan Sinyal Gücü Göstergesi), bant genişliği içindeki radyo sinyal gücüdür. Genellikle dBm (Decibel Milliwatt, Desibel Miliwatt) cinsinden hesaplanmakta ve anten tarafından alınan gücü ifade etmektedir (Poddar ve ark., 2020). İlgili teknolojilerin değerlendirilmesi noktasında sinyalin gücünün önemli bir parametre olduğu düşünülerek her iki iletişim yöntemi testinde de RSSI değerinin gözlemlenmesi uygun görülmüştür. Bunun yanı sıra LoRa teknolojisi için Bölüm 2'de de bahsedildiği üzere SF (Spreading Factor, Yayılma Faktörü) değerinin önemi göz ardı edilmeden bir değerlendirilme yapılmıştır.

Bloklarda yer alan su sayaçları her katta farklı adette olmakla beraber bina girişlerine göre sağ, sol, ön ve arka olmak üzere sayaç şaft tüneli içinde ve metal kalın kapak ile kapalı konumdadır. Doğalgaz sayaçları da aynı şekilde her katta farklı adette olmakla beraber bina koridorlarında açık alanda bulunmaktadır. Her iki testte de sol ve sağ cephe olmak üzere iki farklı konumda gözlemler yapılmıştır. NB-IoT testleri su sayaçları referans alınarak yapıldığından bahsi geçen metal kalın kapak arkasındaki sayaç şaftları içine bırakılan NB-IoT özellikli su sayacı bir el ile tetiklenecek şekilde yayın yaptırılmıştır. LoRa testleri ise gaz sayaçları referans alınarak yapıldığından manyetik alan okuyuculu LoRa sensör, koridorlarda yer alan gaz sayaçlarının üzerine bırakılarak gerekli gözlemler sağlanmıştır.

NB-IoT testinde kullanılan dijital su sayacı mevcut GSM baz istasyonunu altyapı olarak kullanmakta ve iletişim kurabilmek adına herhangi bir ek cihaza (modem, ağ geçidi vb.) ihtiyaç duymamaktadır. Kullanılan NB-IoT teknolojisinin bant genişliği 200 kHz.'dir. Kullanılan sayacın yayın yaptığı sinyalin gücü yaklaşık 23 dBm ve minimum alıcı hassasiyeti -129 dBm seviyesindedir. Sayaç yayın yaptığı zamanlarda yaklaşık 110 mA ve yayın yapmadığı zamanlarda (uyku durumunda) 20 μ A güç tüketmektedir. Sayaçta kullanılan pil 3.6 volt, 8.5 Ah lityum pildir.

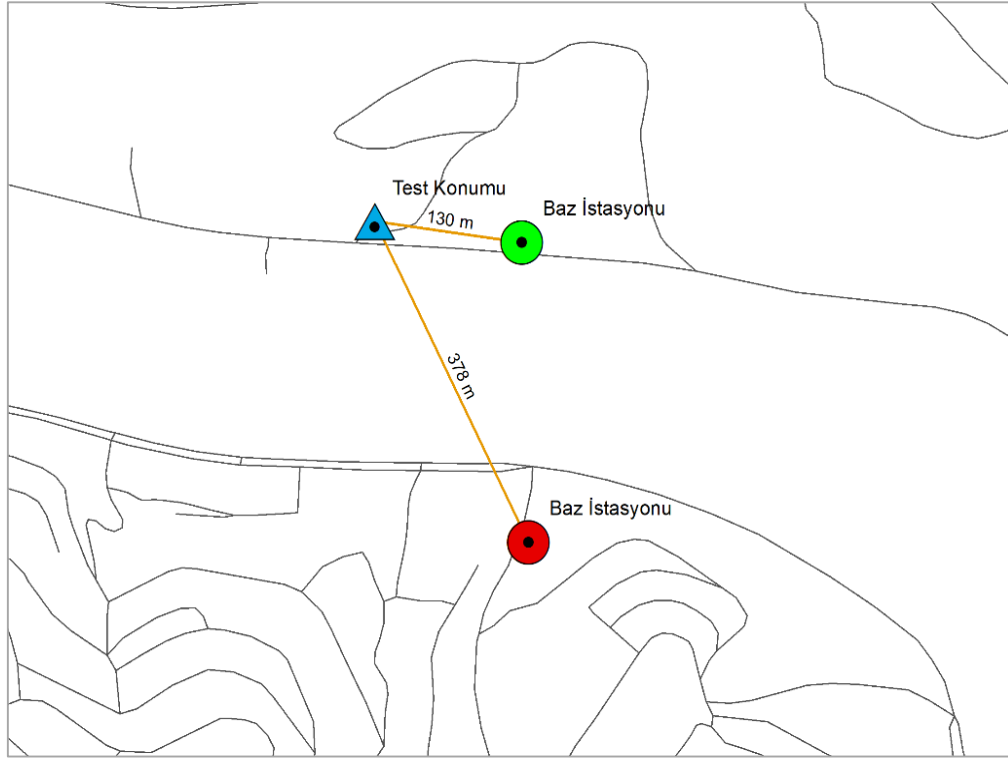
LoRa testlerinde ise analog sayaçları dijital sayaca dönüştürmek amacıyla tercih edilen manyetik alan okuyucu LoRa sensörü kullanılmıştır. Bu sensör doğalgaz sayacının son hanesinde bulunan mıknatıs her döndüğünde ürettiği manyetik alanı okuyup önceden belirlenen endeks değerinin üzerine ekleyerek mevcut endeksi dijital olarak okuyabilmektedir. Şekil 5'te yer alan topolojiden de görüleceği üzere endeks değeri LoRa aracılığı ile LoRaWAN ağ geçidine iletilmekte; bu ağ geçidi tarafından alınan veri MQTT aracılığı ile bulut ortamına oradan da IoT Platformu'na aktarılmaktadır. Bahsi geçen manyetik alan okuyucu LoRa sensörü -138 dBm alıcı hassasiyetine sahiptir. Varsayılan veri gücü 25 mW iken maksimum veri gücü 100 mW olacak şekilde tasarlanmıştır. Kısıtlı kentsel koşullarda radyo kapsama alanı 5 km, görüş alanı içinde radyo kapsama alanı ise 15 km olarak belirtilmiştir.



Şekil 5. LoRa Test Senaryosu Topolojisi

Testlerde kullanılan LoRaWAN ağ geçidi aynı anda birden fazla kanalda çalışmasına izin veren Semtech SX1301 yonga setini kullanmaktadır. Alıcı hassasiyeti -140 dBm ve çıkış gücü maksimum 27 dBm seviyesindedir. 8 kanallıdır ve Avrupa'da yayın yaptığı frekans bandı 863 ile 870 MHz arasında değişmektedir. 10 km geniş kapsama alanı vaadi bulunmaktadır.

NB-IoT özellikli sayaç içerisinde yerel bir ağ operatörünün SIM (Subscriber Identity Module, Abone Kimlik Modülü) kartı bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı bahsi geçen bölgeyi besleyen baz istasyonunun konumu araştırıldıktan sonra bölgeye yakın iki adet baz istasyonu olduğu gözlemlenmiştir. Sinyalin bu istasyonlara ulaştığı düşünülmektedir. Şekil 6'dan da görülebileceği üzere iki baz istasyonundan biri siteye yaklaşık 380 metre kuşbakışı mesafede bulunurken diğeri yaklaşık 130 metre kuşbakışı mesafede bulunmaktadır.



Şekil 6. NB-IoT Test Konumu ile Baz İstasyonları Arasındaki Uzaklık

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

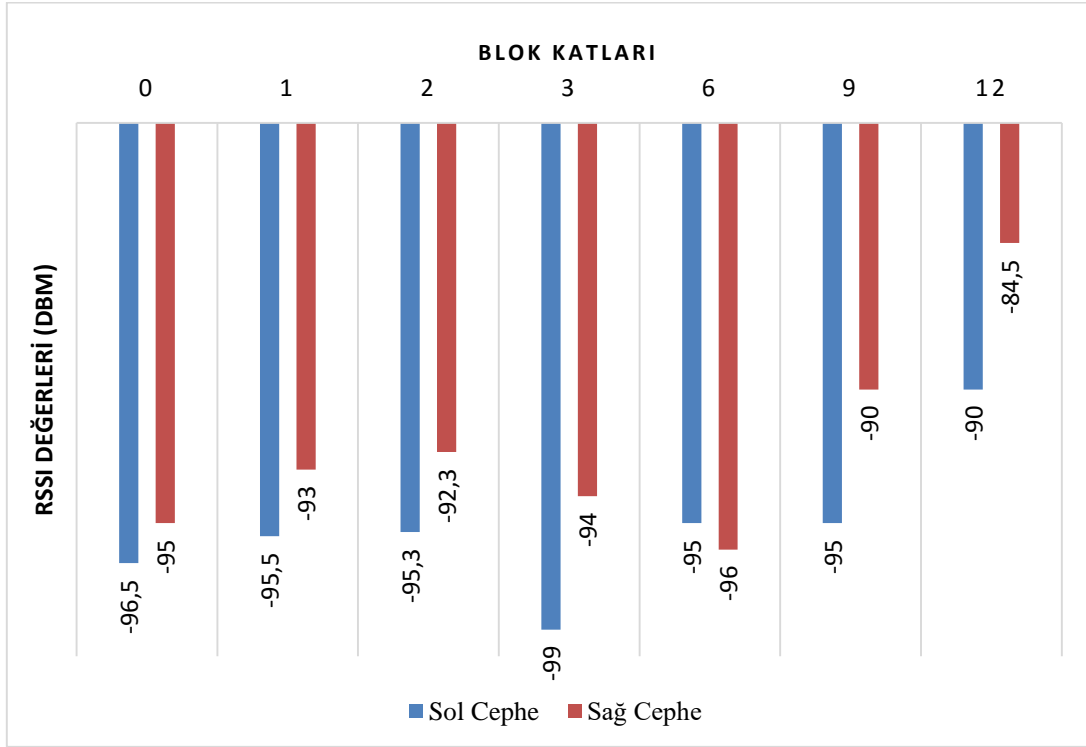
Testler yaz ayının sonlarına doğru birer gün arayla bahsi geçen bloklarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te yer alan A1. Blok LoRa testlerinin gerçekleştirildiği alandır. LoRaWAN ağ geçidi A2. Bloğun bina girişi referans alınarak sol cephesinin çatı katına gerekli kablolar yapılarak herhangi bir montaj aparatı kullanılmadan konumlandırılmıştır. NB-IoT testi ise LoRa testinden bir gün sonra A4. Bloкта yapılmıştır. Her bir testte elektronik cihazlar katlarda gezdirilmiş ve değerler kaydedilmiştir. LoRa testlerinde manyetik alan okuyuculu LoRa sensörüne her ölçüm alanında yeni bir endeks değeri atandıktan sonra, bu değer hem ağ geçidi arayüzü üzerinden hem de verinin gönderildiği platform üzerinden kontrol edilerek gönderilen verinin doğruluğundan emin olunmuştur. NB-IoT testinde ise RSSI değerleri sayaç ekranından okunarak sonrasında verinin iletildiği Platform üzerinden kontrol edilmiştir. Testler 0, 1, 2, 3, 6, 9 ve 12. katlarda bina girişi referans alınarak sol ve sağ cephe olarak ikişer kez tekrarlanmıştır. LoRa testi için 14; NB-IoT testi için ise 16 paket gönderilmiştir.

Binalar İstanbul'da sıklıkla görülen betonarme yapıdadır. Bloğun çevresinde veri iletimini olumsuz etkileyecek ve gürültüyü artıracak etkiye sahip binalar yer almaktadır. Bu haliyle İstanbul'un bir örneğini oluşturuyor oluşu bölgenin tercih edilirliliğini bu çalışma için artırıcı yönde bir etki oluşturmuştur.

4.1. LoRa Testi

LoRa testleri Şekil 4'te görülen A1. Bloкта gerçekleştirilirken LoRaWAN ağ geçidi A2. Bloğun bina girişi referans alınarak sol cephesine konumlandırılmıştır. Testler 0, 1, 2, 3, 6, 9 ve 12. katlarda bina girişleri referans alınarak sol ve sağ cephe olarak iki farklı noktada yapılmıştır. LoRa haberleşme teknolojisi testlerinde kaydedilen RSSI değerlerine Şekil 7 aracılığı ile ulaşılabilir. Verilerin iletildiği ağ geçidi arayüzündeki bulgular incelendiğinde gönderilen 14 paketin de ağ geçidine ulaştığı sonucuna varılabilir. Bu da herhangi bir paket kaybı yaşanmadığını

göstermektedir. Ancak uç düğüm aracılığı ile iletilen verilerin ağ geçidine ulaşması noktasında zaman gecikmesi sorunu yaşandığı gözlemlenmiştir.

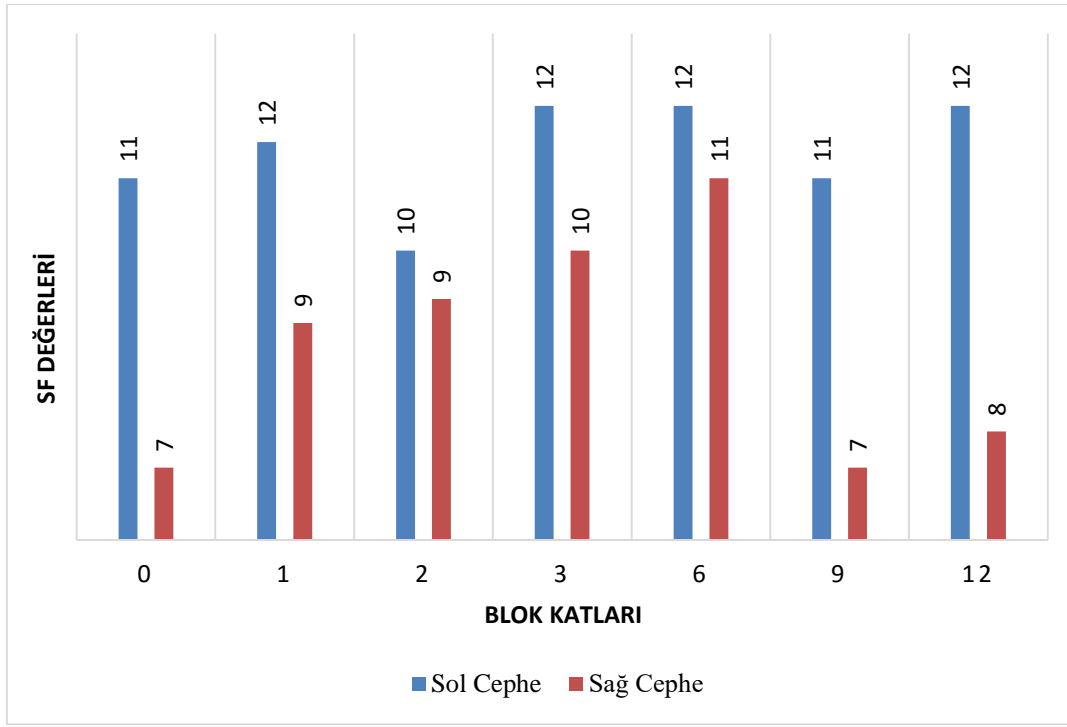


Şekil 7. LoRa Testi RSSI (Alınan Sinyal Gücü Göstergesi) Değerleri

Şekil 7 incelendiğinde binanın her iki cephesinde de ara katlar hariç uç düğümün yukarı katlara çıkması ile sinyalin gücünün iyileştiği görülebilmektedir. Ancak her iki cephede de katlar arası geçişlerde doğrusal bir bağlantı kurulamamaktadır. Şekil 4 incelendiğinde A1. Bloğun sağ kanadı ile LoRaWAN ağ geçidinin konumlandırıldığı A2. Bloğun sol kanadının birbirine daha yakın olduğu ve diğer cepheye nazaran arada bulunan engel sayısının çok daha az olduğu görülebilmektedir. Bu durum sağ cephedeki sinyalin kalitesinin sol cephedeki sinyalin kalitesinden genel olarak daha iyi oluşunu açıklamaktadır.

Yukarı katlara çıktıkça sinyalin gücünün artması testin gerçekleştirildiği betonarme yapı binada sinyalin katlar arası geçişlerde engellendiğini göstermektedir. Buna ilaveten sol ve sağ cephede yukarı çıktıkça sinyalin gücünün iyileşmesi ağ geçidi ile sensör arasındaki mesafenin sinyalin kalitesini olumsuz olarak etkilediği çıktısını da vermektedir.

Ara katlar olarak değerlendirilecek üç ve altıncı katlarda ise hem sağ hem de sol cephede sinyalin gücünün bir önceki katlara göre düştüğü gözlemlenmiştir. Manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü ile ağ geçidi arasındaki mesafenin azalmasının sinyalin gücünü iyileştiremiyor oluşu bu parametrenin sadece mesafe ile ilişkili olmadığını göstermektedir. Ayrıca aynı cephedeki ölçümler düşünüldüğünde yukarı katlara çıkıldıkça manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü ile ağ geçidi arasındaki engelin niteliğinin değişmediği düşünülürse bu duruma neden olan parametrenin iki cihaz arasındaki engelin niteliği ile ilişkili olmadığı da görülebilmektedir. Bu duruma neden olan parametrenin uç düğümün anteni ile ağ geçidinin anteni arasındaki açı olduğu değerlendirilmektedir. Sinyalin bu görüş açısındaki değişikliklerden etkilendiği görülmektedir. LoRa testlerinde kaydedilen SF değerlerine Şekil 8 aracılığı ile ulaşılabilir.



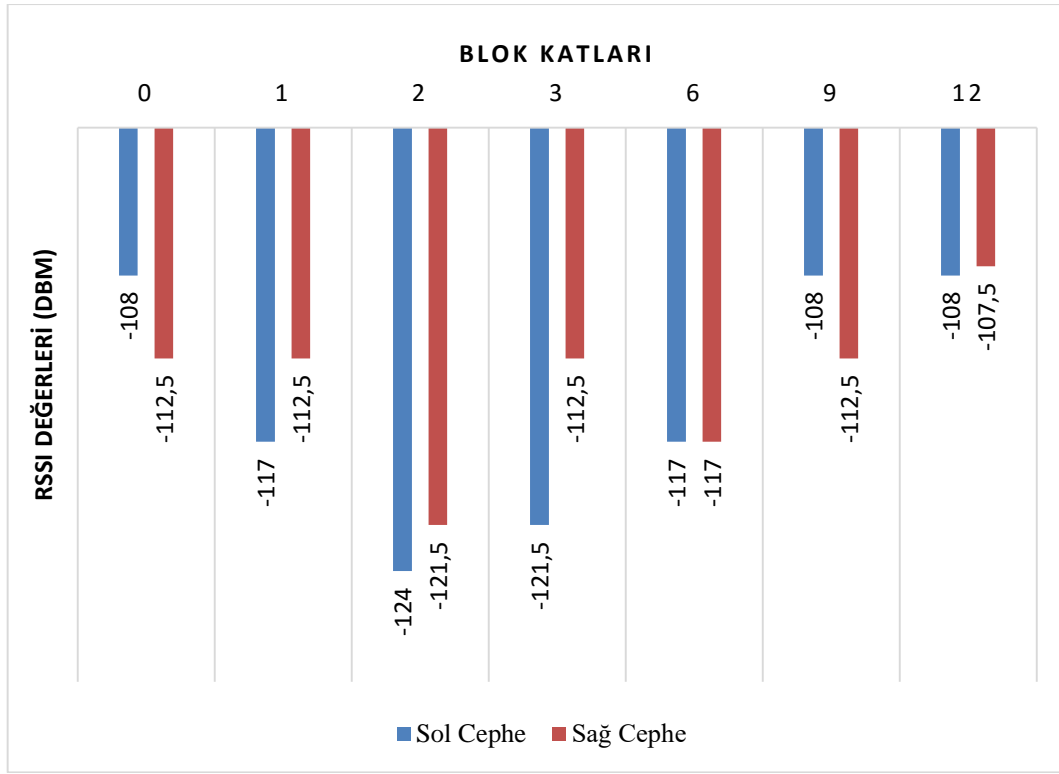
Şekil 8. LoRa Testi SF (Spreading Factor, Yayılma Faktörü) Değerleri

Şekil 8 incelendiğinde her iki cephede de katlar arasındaki geçişlerde veri hızları arasında doğrusal bir bağlantı kurulamadığı görülebilir. Grafik irdelenecek olursa eğer tüm katlarda sağ cephedeki ölçümlerde veri hızı sol cepheye kıyasla daha hızlıdır. Bu da RSSI değerlerinde olduğu gibi LoRaWAN ağ geçidinin konumunun A1. bloğun sağ cephesine daha yakın bulunmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla iletilen sinyalin baz istasyonuna ulaşması esnasında karşılaşılan engel sayısı sol cepheye nazaran daha azdır.

Sağ cephede ara katlarda orta ve yavaş bandında seyreden veri hızı yukarıya doğru hızlı durumuna geçmektedir. Bu da yukarı katlarda ağ geçidi ile manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü arasındaki iletişimin sorunsuz olarak yapıldığını ve herhangi bir sorunla karşılaşmayan sinyalin veri hızını artırarak kanalı işgal etmediğini göstermektedir. Sol cephede ise genel olarak tüm katlarda veri hızı yavaş bandında seyretmektedir. Bu da sinyalin ağ geçidine ulaşırken sorun yaşadığını göstermektedir. Bu şekilde bir kurulum yapıldığında sensör aracılığı ile iletilen verinin kanalı sürekli işgal edeceği öngörülmektedir.

4.2. NB-IoT Testi

NB-IoT testleri Şekil 4'te görülen A4. Bloкта gerçekleştirilmiştir. Testler 0, 1, 2, 3, 6, 9 ve 12. katlarda bina girişleri referans alınarak sol ve sağ cephe olarak iki farklı noktada yapılmıştır. Su sayaçlarının bulunduğu alan olan kalın metal kapak arkasındaki sayaç şaftları içine bırakılan NB-IoT özellikli su sayacı bir el ile tetiklenecek şekilde yayın yaptırılmıştır. Şekil 6'da görülebileceği üzere alana yakın bulunan iki adet baz istasyonundan biri bölgeye yaklaşık 380 metre kuşbakışı mesafede bulunurken diğeri yaklaşık 130 metre uzaklıktadır. Şekil 9'da testlerin çıktısı olan RSSI değerleri yer almaktadır.



Şekil 9. NB-IoT Testi RSSI Değerleri

Verilerin iletiildiği ağ sunucusundaki bulgular incelendiğinde gönderilen 16 paketin de ağ geçidine ulaştığı sonucuna varılabilir. Bu da herhangi bir paket kaybı yaşanmadığını göstermektedir. Ancak uç düğüm aracılığı ile iletilen verilerin ağ geçidine ulaşması noktasında zaman gecikmesi sorunu yaşandığı gözlemlenmiştir.

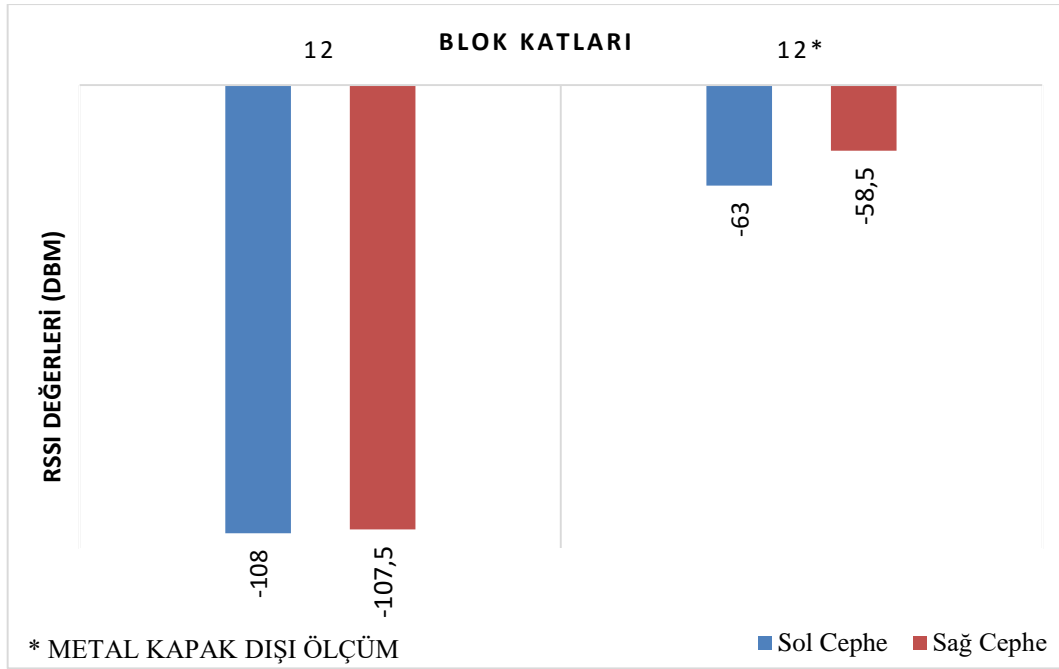
Metal kapak içi ölçümlerde elde edilen RSSI değerleri irdelenecek olursa eğer aynı cephedeki ölçümlerde katlar arası geçişlerde doğrusal bir bağlantı olmadığı görülebilir. Bunun yanı sıra iki cephe arasında da doğrusal bir ilişki kurulamamaktadır. Katlarda iletilen sinyallerin bölgeye yakın iki baz istasyonunu da altyapı olarak kullanmış olabileceği düşünülmekte ancak hangi katta hangi istasyonun kullanıldığı bilgisine ulaşamadığı için iki cephe arasında kurulacak olan ilişki anlamlı olmamaktadır.

Değerler hangi RSSI değerinin nasıl sonuç doğurduğuna dair bilgilerin yer aldığı Tablo 1 ile ilişkilendirildiğinde tüm noktalardaki sinyalin kalitesinin ideal aralıkta bulunmadığı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 1. NB-IoT RSSI Referans Değerleri (Poddar ve ark., 2020)

Referans Değer	Durum
> -65 dBm	Çok İyi
-65 ile -75 dBm	İyi
-75 ile -85 dBm	Orta
< -85 dBm	Kötü

Metal kapağın sinyalin kalitesini nasıl etkilediğini görmek adına 12. katın sağ ve sol cephesinde metal kapağın dışında da ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlere Şekil 10 aracılığı ile ulaşılabilir.



Şekil 10. Metal Kapağın RSSI Değerlerine Etkisi

Şekil 10'da yer alan ölçüm sonuçları irdelenecek olursa eğer metal kapağın sinyalin kalitesine etkisi görülebilir. 12. katta metal kapağın her iki cephede de ortalama 47 dBm kayıp yaşattığı gözlemlenmektedir. İlgili katta yapılan ölçümler Tablo 1'e göre değerlendirilecek olursa eğer sayaç, tesisat şaftı içerisindeyken her iki cephede de sinyalin kalitesi kötü olarak değerlendirilmekte iken aynı noktalarda şaft dışında yapılan gözlemlerde sinyalin kalitesinin mükemmel duruma geçtiği görülmektedir. Bu test metal kapağın ilgili katta sinyalin kalitesini ne denli etkilediğini gözler önüne sermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Eyüpsultan ilçesi sınırları içerisinde yer alan dört bloklu bir sitenin iki bloğunda birer gün arayla LoRa ve NB-IoT haberleşme teknolojilerinin performans analizlerinin yapılabilmesi adına bir dizi test gerçekleştirilmiştir. Testler iki binanın da sol ve sağ cephesi olmak üzere 0, 1, 2, 3, 6, 9 ve 12. katlarda ikişer defa tekrarlanmış olup NB-IoT için RSSI; LoRa için ise RSSI ve SF değerleri not alınmıştır. Her testte uç düğümlerden birer adet paket gönderilmiş olup toplamda LoRa için 14, NB-IoT için ise 16 paket gönderilmiştir. Testler gaz ve su sayaçlarını uzaktan okuyabilmek adına bir haberleşme performans değerlendirmesini içermektedir. Bina içerisinde gaz sayaçları herhangi bir kapak ile muhafaza edilmeden koridorlarda açık olarak bulunmakta; su sayaçları ise kalın metal bir kapak arkasında yer alan sayaç şaft tüneli içerisinde yer almaktadır. Gaz sayaçları için LoRa, su sayaçları için ise NB-IoT performans değerlendirmesi yapıldığından LoRa testinde kullanılan manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü koridorlarda açık bulunan gaz sayaçlarının üzerinde; NB-IoT testinde ise sayısal su sayacı sayaç şaft tüneli içerisinde metal kapak arkasına konularak testler gerçekleştirilmiştir.

LoRaWAN ağ geçidinin konumlandırıldığı binanın girişi ile LoRa testlerinin yapıldığı bina girişi arasında yaklaşık olarak 45 metre mesafe bulunmaktadır. NB-IoT testlerinde kullanılan sayacın içerisinde yerel bir ağ operatörüne ait SIM Kart yer almaktadır. İlgili operatöre ait iki adet baz istasyonundan biri bölgeye yaklaşık 380 metre kuşbakışı mesafede diğeri ise yaklaşık 130 metre kuşbakışı mesafede bulunmaktadır.

Verilerin iletiildiği ağ sunucularındaki bulgular incelendiğinde her iki teknoloji özelinde toplamda gönderilen 30 paketin de ağ geçidine başarılı bir şekilde ulaştığı sonucuna varılabilir. Bu da herhangi bir paket kaybı yaşanmadığını göstermektedir. Ancak 30 paketin bu parametreyi değerlendirmede yeterli olmadığı ve daha çok paket üzerinde gözlemler yapılmasının bu oranı değiştireceği öngörülmektedir. Daha iyi bir gözlem için farklı baz istasyonu kullanım yoğunluklarında ve farklı çevre koşullarında gözlemler yapılması ve iletilen paket sayısının artırılması gerektiği düşünülmektedir.

LoRa için ağ geçidi ve uç düğüm arasında; NB-IoT için ise baz istasyonu ile uç düğüm arasında sinyal iletimi noktasında zaman gecikmesi yaşandığı gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmanın da temelini oluşturan akıllı sayaçlar gibi uygulamaların titreşime ve gecikmeye duyarlı olduğu düşünüldüğünde bu parametrenin ilgili teknolojileri değerlendirmede birincil öncelik taşımadığı belirtilmelidir.

Bölüm 4'te detaylı olarak yer verilen RSSI değerinin her iki teknoloji özelinde de belirli noktalarda ideal aralıkta bulunmayışının birçok gerekçesi bulunmaktadır;

Bunların başında testin gerçekleştirildiği binanın betonarme yapıda oluşu gelmektedir. LoRa teknolojisinde kullanılan sensörün ağ geçidine yaklaşırken sinyalin gücündeki iyileşme betonarme yapı binalarda sinyalin katlar arası geçişlerde engellendiğini göstermektedir. NB-IoT teknolojisinde ise sayısal su sayacının hangi katta hangi baz istasyonu ile iletişim kurduğu bilgisine ulaşılamadığı için sinyalin katlar arası geçişlerdeki bağlantısı ve uç düğüm ile baz istasyonu arasındaki mesafenin sinyalin gücüne etkisi arasında mutlak bir bağlantı kurulamamaktadır. Ancak İstanbul genelindeki binaların genel olarak beton malzeme ile oluşturulduğu düşünülürse eğer bu parametrenin her iki teknoloji için de bazı sorunlar doğuracağı düşünülmektedir.

İkinci olarak ise LoRa ölçümlerinin koridorlarda bulunan açık alanlarda yapıldığı düşünülürse yalnızca NB-IoT ölçümleri için geçerli olan metal kapak engeli gelmektedir. NB-IoT testlerinde sinyalin gücünü ortalama 47 dBm düşüren metal kapağın İstanbul genelindeki görece yeni olan birçok binada su sayaçlarını koruduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda ilgili gösterge İstanbul genelinde yer alan birçok binanın örneğini oluşturmaktadır. Bu kapsamda ilgili parametrenin NB-IoT teknolojisine etkisinin göz ardı edilemeyeceği belirtilmelidir.

Üçüncü öneme sahip etken ise LoRa ve NB-IoT testlerinde kullanılan uç düğümlerin ve LoRaWAN ağ geçidinin kurulumlarının eksik olmasıdır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen testlerde herhangi bir kurulum yapılmamıştır. Bu durumda testler esnasında kullanılan her cihaz için kurulum şemalarının tamamlanmamış olmasının da sinyal kalitesini etkilediği düşünülmektedir.

Diğer etken ise LoRa testleri sırasında kullanılan ağ geçidinin konumlandırıldığı dış ortam için değil de genellikle iç ortam kapsayıcılığında kullanılmak üzere tasarlanmış olması gösterilebilir. Picocell olarak ifade edilen bu ağ geçitleri genelde ofisler, alışveriş merkezleri gibi alanlarda kullanılmak için tasarlanmış olup dış mekân kullanımları için tercih edilme oranları yüksek değildir.

Son olarak ise NB-IoT teknolojisi özelinde Koronavirüs salgını kapsamında uzaktan eğitim ve çalışmanın yaygın olduğu bir dönemde ve mesai saatleri içerisinde gerçekleştirilen testlerde baz istasyonunu kullanım oranının görece daha fazla olması değerlendirilmektedir. Ancak gerçek bir sayaç haberleşme uygulamasında veri gönderim zamanlarının baz istasyonlarını kullanım oranlarının az olacağı zaman dilimlerinde planlanacağı düşünülürse eğer bu parametrenin olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılacağı öngörülmektedir.

LoRa'nın yayılma faktörü değerlendirilecek olursa eğer testin yaklaşık %65'lik kısmında çok yavaş veri hızı ile sinyalin kanalı sürekli olarak işgal ettiği, kalan %35'lik kısmında ise uç düğüm ile ağ geçidi arasındaki mesafenin ve dolayısıyla aradaki engel sayısının oldukça azaldığı gözlemlenmiştir. Antenin görüş açısında meydana gelen değişimler, betonarme yapı binada sinyalin katlar arasındaki geçişlerden etkilenmesi, yansıma ve ağ geçidi ile uç düğüm arasındaki mesafenin bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak hangi teknolojinin seçileceği noktasında bir seçim yapılabilmesinin farklı alıcı ve vericilerin, farklı çevre koşullarının, çok sayıda uç düğüm ile gözlemler yapılmasının akabinde verilebilecek bir karar olduğu belirtilmelidir. Bu çalışma kapsamında yürütülmüş olan faaliyetler hangi teknolojinin daha uygun olduğuna dair kesin bir çıktı oluşturamamaktadır. Ancak farklı alıcı/vericiler ve uç düğüm sayısındaki artış şartının sağlanması durumunda gerçekleştirilecek olan değerlendirmenin yalnızca ilgili bölge için bir performans analizi içereceğinin de belirtilmesi gerekmektedir. Çünkü İstanbul coğrafi yapısı ve mimarisi düşünüldüğünde sinyal iletimi söz konusu olduğunda birçok farklı bölgeye ayrılabilir bir şehir olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda her bölgenin ilgili haberleşme teknolojileri özelinde ayrıca değerlendirilmesi daha kapsamlı bir çıktı oluşturabilecektir. Ayrıca İstanbul için birden çok teknolojiyi içeren hibrit bir çözümün şehrin genelini kapsanmasında daha iyi bir sonuç doğuracağı öngörülmektedir.

Bu çalışmada Türkiye'de kullanım oranı az olan NB-IoT ve LoRa haberleşme teknolojilerinin İstanbul özelinde uygulanması incelenmiştir. NB-IoT ve LoRa haberleşme teknolojilerinin gerçek test ortamında uygulanması sonucunda bulunan sayısal değerlerinin verilmesi, sistemin kullanıldığı yerin (yükseklik, betonarme bina, metal kapaklı bir ortam, gsm anten konumuna mesafe) sistem kalitesine etkisinin sayısal değerlerle belirtilmesi, bu iki yöntemin ticari uygulamalarda kullanımına bir bakış açısı katmıştır. Ayrıca test ortamlarının birebir aynı olmasa da iki farklı haberleşme teknolojisinin kıyaslanabilmesi için sayısal bir veri ortaya koyulmuştur. Bu sayede teknoloji seçiminde nelere dikkat edilmesi gerektiğine dair somut değerlendirmeler yapılmıştır.

Daha iyi bir sonuç için gerekli tüm kurulumların tamamlanmasının ardından bir süre gözlem yapılarak kaydedilen değerler üzerinde paket kayıp oranlarının hesaplanması ve bu sonucun da referans alınarak ilgili teknolojilerin performans analizinin yapılması gerektiği ifade edilmelidir. İlgili testlerin devamında bu çalışma farklı radyo modemler ve çevre koşulları ile gerçekleştirilerek her iki teknolojinin de İstanbul özelinde örneklem oluşturacak bu alanda ne gibi sonuçlar doğuracağı gözlemlenecektir.

Yazarların Katkısı

Bu çalışmada Sümeyye YASİNTİMUR fikir, araştırma, veri toplama, analiz, yorum, kaynak taraması ve makalenin yazımı konusunda katkı sağlamıştır. Vedat TAVAS fikir, eleştiri ve makalenin yazımı konusunda katkıda bulunmuştur.

Teşekkür

Yazarlar uygulama aşamasında kullanılan test ortamının sağlanmasında katkılarından dolayı İBB (İstanbul Büyükşehir Belediyesi), İSKİ (İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi) ve İGDAŞ (İstanbul Gaz Dağıtım Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi)'a teşekkürlerini sunar.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J. ve Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*. 55(9), 34–40.
- Chen, M., Miao, Y., Hao, Y. ve Hwang, K. (2017, Eylül). Narrow band internet of things. *IEEE Access*. 5, 20557–20577.
- Kabalci, Y. ve Ali, M. (2019, Haziran, 12-15). *Emerging LPWAN technologies for smart environments: An Outlook*. 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). Türkiye. 24-29.
- Lalle, Y., Fourati, L. C., Fourati, M. ve Barraca, J. P. (2019, Aralık, 18-20). *A comparative study of LoRaWAN, SigFox, and NB-IoT for smart water grid*. 2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS). Fransa. 1-6.
- Li, L., Ren, J. ve Zhu, Q. (2017, Şubat, 21-24). *On the application of LoRa LPWAN technology in Sailing Monitoring System*. 2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). Amerika. 77–80.
- LoRa Alliance (2015). A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. *Technical Marketing Workgroup 1.0*, 20.
- LoRa Alliance (2021). LoRaWAN® coverage. <https://lora-alliance.org/lorawan-coverage/> adresinden 26 Şubat 2021 tarihinde alınmıştır.
- Lueth, K.L. (2018). State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B – Market accelerating. IOT ANALYTICS. <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/> adresinden 23 Şubat 2021 tarihinde alınmıştır.
- Malik, H., Khan, S. Z., Sarmiento, J. L. R., Kuusik, A., Alam, M. M., Le Moullec, Y. ve Parand, S. (2019, Haziran, 24-28). *NB-IoT network field trial: Indoor, outdoor and underground coverage campaign*. 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Fas. 537–542.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. ve Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*. 5(1), 1–7.
- Paredes, M., Bertoldo, S., Carosso, L., Lucianaz, C., Marchetta, E., Allegretti, M. ve Savi, P. (2019). Propagation measurements for a LoRa network in an urban environment, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 33(15), 2022–2036.
- Poddar, N., Khan, S. Z., Mass, J. ve Srirama, S.N. (2020, Haziran, 15-19). *Coverage analysis of NB-IoT and sigfox: Two Estonian University campuses as a case study*, International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Kıbrıs. 1491–1497.
- Semtech (2015). LoRa™ Modulation Basics, Rapor No: AN1200.22, 26s.
- Sultania, A. K., Zand, P., Blondia, C. ve Famaey, J. (2018, Aralık, 9-13). *Energy modeling and evaluation of NB-IoT with PSM and eDRX*. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Birleşik Arap Emirlikleri.

- Vatcharationsakul, N., Tuwanut, P. ve Pornavalai, C. (2017, Temmuz, 12-14). *Experimental performance evaluation of LoRaWAN: A case study in Bangkok*. 14th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE). Tayland.
- Wang, Y.-P. E., Lin, X., Adhikary, A., Grovlen, A., Sui, Y., Blankenship, Y., Bergman, J. ve Razaghi, H. S. (2017). A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB-IoT)", *IEEE Communications Magazine*. 55 (3), 117-123.